



REPUBLIQUE DU BENIN

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

\*\*\*\*\*

Institut National de l'Eau

\*\*\*\*\*

Département d'hydrologie

\*\*\*\*\*

Option : Hydrologie quantitative

Grade : Licence

**MÉMOIRE DE LICENCE**

**FUSION DES ESTIMATIONS SATELITAIRES  
TAMSAT ET DES DONNEES DE PRECIPITATIONS  
IN SITU SUR LE BASSIN VERSANT DE L'OUEME  
A BETEROU**

**Présenté par :**

LASATOU Fadhyl

**Sous la supervision de :**

Dr N'TCHA M'Po



## **Avant-propos**

Le présent travail rentre dans le cadre de la thèse de Monsieur Mandela HOUNGNIBO intitulée modélisation hydrologique hyper-résolue... Dans le cadre de cette thèse, la constitution d'un ensemble de données climatiques représentatif spatialement du domaine d'étude est une étape primordiale. Ainsi, l'opportunité de la mise en œuvre de la combinaison des données satellitaires et des données in-situ d'observation a été proposée pour répondre à cet impératif. Et, il nous a été proposé de travailler sur une des méthodes de fusion pour que plus tard une approche comparative soit effectuée parmi différentes approches.

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à mes parents

- ✓ LASATOU Issiakou
- ✓ ANAGO-KOUTA Jeanne

## Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui, aux encouragements et à la disponibilité de plusieurs personnes. Mes sincères remerciements sont donc adressés :

- à mon premier encadreur, le DrN'Tcha M'Po Y. pour sa disponibilité, ses conseils, sa rigueur pédagogique et son soutien moral qui ont contribué à la finalisation de ce travail;
- à mon second encadreur Mr HOUNGNIBO Mandela pour m'avoir proposé ce thème, pour sa disponibilité et pour toute l'inspiration dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail;
- au corps professoral de la licence en hydrologie pour l'enseignement de qualité qui nous a été dispensé ;
- à tous les membres de ma famille pour leur soutien sans faille durant toutes ces trois ans de formation ;
- Tous mes camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régné tout au long de notre formation, bonne suite à tous. ;

## Résumé

Les pratiques de gestion des sécheresses et des inondations nécessitent des estimations précises des précipitations. Cependant, les observations de jauge sont souvent rares dans les régions au terrain compliqué, regroupées dans des vallées et de mauvaise qualité. Par conséquent, l'étendue spatiale des événements humides est peu représentée. Les données sur les précipitations obtenues par satellite constituent une solution de rechange intéressante, bien qu'elles aient tendance à sous-estimer l'ampleur des événements humides en raison de leur dépendance à l'égard des algorithmes de récupération et de la relation indirecte entre les observations infrarouges satellitaires et l'intensité des précipitations. Nous proposons ici une approche pour mélanger les données des pluviomètres AMMA-CATCH et les estimations des précipitations par satellite TAMSAT sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Tout d'abord, nous avons effectué un contrôle de la qualité pour déterminer les lacunes des données pluviométriques AMMA-CATCH. Une évaluation des erreurs entre les estimations des satellites et ceux des pluviomètres est faite ensuite puis la méthode d'ajustement de biais simple développé est utilisé pour combiner les estimations TAMSAT et les données des pluviomètres AMMA-CATCH. Les résultats de la validation croisée montrent que le produit fusionné à donner les meilleurs résultats en terme RSME, de MAE, de corrélation et de Nash par rapport au produit satellitaire. Le produit fusionné c'est également montré meilleure que les observation interpolé sur les zones avec peu de station. Néanmoins, le produit fusionné n'a montré que de légère amélioration par rapport au produit satellite TAMSAT, il nous revient donc de trouver une méthode plus sophistiqué qui nous permettra d'obtenir un produit fusionné avec moins d'erreur aléatoires et plus performant.

**Mots clés :** données pluviométrique, produit interpolé, fusion de données

## **Abstracts**

Drought and flood management practices produce accurate precipitation estimates. However, gauge observations are often sparse in regions with complicated terrain, clustered in valleys, and of poor quality. Consequently, the spatial extent of wet events is poorly represented. Satellite-collected precipitation data provided an attractive alternative, although they tended to underestimate the magnitude of wet events due to their reliance on retrieval algorithms and the indirect relationship between satellite infrared observations and precipitation intensity . Bétérou outlet. First, we performed quality control to determine gaps in the AMMA-CATCH rainfall data. An evaluation of the errors between the estimates of the satellites and those of the rain gauges is then made then the simple bias adjustment method developed is used to combine the TAMSAT estimates and the data of the AMMA-CATCH rain gauges . The results of the validation showed that the merged product gave the best results in terms of RMSE, MAE, correlation and Nash compared to the satellite product. The merged product also showed better than the interpolated observations on the areas with few stations. Nevertheless, the merged product showed only slight improvement compared to the TAMSAT satellite product, so it is up to us to find a more sophisticated method that will allow us to obtain a merged product with fewer random errors and more efficiency.

**Keywords:** rainfall data, interpolated product, data fusion

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstracts</b>	<b>4</b>
<b>Table des matières</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figure</b>	<b>7</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>8</b>
<b>Sigles et acronymes</b>	<b>9</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>10</b>
<b>1. Contexte et justification de l'étude</b>	<b>10</b>
<b>2. Hypothèses de travail</b>	<b>11</b>
<b>3. Objectifs du mémoire</b>	<b>11</b>
<b>4. Revue de littérature sur la fusion des données in-situ et satellitaires</b>	<b>11</b>
<b>5. Résultats attendus</b>	<b>13</b>
<b>6. Structure du mémoire</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction	13
1.2 Milieu d'étude	13
1.3 Données utilisées	14
1.4 Matériel utilisé	16
1.5 Méthodologie utilisée	16
1.5.1 Contrôle de qualité des données des postes pluviométriques	16

1.5.2 Combinaison des données in-situ avec les estimations satellitaires TAMSAT	17
1.5.3 validation des données fusionnées	17
1.6 Conclusion partielle	18
<b>Chapitre 2 : Résultats et Discussion</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction	18
2.2 État des lieux de la série des données de jauge	18
2.3 Les produits et leurs évaluations	19
2.3.1 Description des produits	19
2.3.2 Évaluation du biais entre les données de jauge et l'estimation satellitaire	20
2.3.3 Validation croisée des produits satellitaire, interpolés et combinés	22
2.2 Conclusion partielle	27
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>28</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>29</b>
<b>Annexes</b>	<b>31</b>

## Liste des figure

Figure 1 : Pourcentage de données manquantes par stations et par mois	15
Figure 2: Données mergées de pluie pour la deuxième décade de juillet 2006. Observation (en haut à gauche), satellitaire brute (en haut à droite), observation interpolée (en bas à gauche), mergée (en bas à droite).	16
Figure 3 : Distribution en % de biais relatif pour toutes les stations pour tous les mois. Une valeur inférieure à 1 indique une surestimation tandis qu'une valeur supérieure à 1 indique une sous-estimation.	17
Figure 4 : Distribution spatiale de l'erreur absolue moyenne (MAE) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre l'estimation du satellite et les données des pluviomètres à chaque emplacement de station	18
Figure 5 : Distribution spatiale du coefficient de corrélation de Pearson (CORR) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC	20
Figure 6 : Distribution spatiale de l'erreur absolue moyenne (MAE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC	21
Figure 7 : Distribution spatiale de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC	22
Figure 8 : Distribution spatiale du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC	23



## Liste des tableaux

Tableau 1 :FORMULE DES SCORES DE STATISTIQUES CONTINUES UTILISÉES ET LEURS SCORES PARFAITS	23
--	----

## **Sigles et acronymes**

TAMSAT: Tropical Application of Meteorology Using Satellite Data and Ground-Based Observations

AMMA-CATCH : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

# Introduction

## → Contexte et justification de l'étude

La forte variabilité interannuelle, la recrudescence d'événements pluviométriques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, les fortes pluies... affectent les populations béninoises et leurs activités en l'occurrence la production agricole qui représente le secteur principal de l'économie béninoise . Pour faire face à ces différents risques pluviométriques, il est important de produire de la connaissance scientifique pertinente, gage d'un bon système d'alerte précoce pour la prise de décision. Pour ce faire, des séries historiques de précipitation assez longues avec une bonne couverture spatiale sont nécessaires (Dinku et al. 2014). Cependant, la disponibilité de données pluviométriques fiables et à des échelles spatiales fines reste une contrainte en Afrique et au Bénin en particulier.

En effet, Le réseau pluviométrique d'observation au Bénin qui représente l'observation de référence n'est pas suffisamment dense et les données peuvent être sujettes à quelques lacunes (Observateurs, Sites, l'instrumentation, données manquantes) (nicholson). Pour pallier le manque de mesures pluviométriques dans les localités dépourvus de mesures directes de la pluie ou pour combler les lacunes dans les séries pluviométriques , les chercheurs et les techniciens ont recours aux estimations satellitaires de précipitations . Les satellites estiment les précipitations à partir des capteurs infrarouges thermiques ou micro-ondes passifs ou une combinaison des deux (Chris Kidd et Huffman 2011; C. Kidd et Levizzani 2010). Le principal avantage des estimations satellitaires de pluie reste leur bonne couverture spatiale . Toutefois, les ensembles de données satellitaires actuellement disponibles souffrent d'un certain nombre de lacunes, notamment des séries temporelles courtes, une inhomogénéité temporelle et une mauvaise précision (Dinku et al. 2014).

Au regard des avantages et inconvénients présentés par ces deux sources de données pluviométriques, il serait intéressant de les combiner afin de bonifier leur avantage pour obtenir des données haute résolution avec une bonne couverture spatiale et relativement précise pour aider à la production de connaissances scientifiques et à l'alerte précoce. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude intitulée : **Fusion des estimations satellitaires TAMSAT (Tropical Application of Meteorology Using Satellite Data and Ground-Based Observations) et des données de précipitations in situ sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.**

## → Questions de recherches

Cette étude répond aux questions suivantes :

- Quelle est la qualité des relevés pluviométriques sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou ?
- Quelles sont les erreurs associées aux estimations satellitaires TAMSAT ?
- La fusion des estimations satellitaires de pluie TAMSAT et des relevés pluviométriques, résulterait-elle à un produit de meilleures qualités (précision et couverture spatiale) ?

## → Hypothèses de travail

Les réponses aux questions posées ci-dessus suscitent les hypothèses suivantes :

- Les observations in-situ de pluie sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou sont sujettes à des lacunes qu'il convient d'épurer.
- Les estimations satellitaires TAMSAT présentent des écarts en comparaison à l'observation directe de pluie qu'il faut évaluer.
- Le produit obtenu après combinaisons des données in-situ et satellite présente une meilleure qualité que les analyses de précipitation (spatialisation des données in-situ) et l'estimation satellitaire.

## → Objectifs du mémoire

L'objectif global de cette étude est de produire des données pluviométriques de bonne qualité et de résolution spatiale assez fine pour la production de connaissances scientifiques et pour le suivi pluviométrique à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Plus spécifiquement, l'étude vise à :

- Contrôler de la qualité des relevés pluviométriques in situ ;
- Évaluer les erreurs des estimations satellitaires TAMSAT;
- Combiner les données in-situ de pluviométrie avec les estimations satellitaires TAMSAT ;
- Evaluer/valider la procédure de fusion des deux types de données ;

## → Revue de littérature sur la fusion des données in-situ et satellitaires

Une estimation précise des précipitations spatiales est cruciale pour la modélisation des systèmes hydrologiques et la planification et la gestion des ressources en eau. Bien que les précipitations spatiales puissent être estimées soit à l'aide de mesures basées sur des pluviomètres, soit à l'aide de mesures satellitaires, ces estimations sont sujettes à des incertitudes dues à diverses sources d'erreurs dans les deux cas, y compris des erreurs d'interpolation et de récupération (Woldemeskel, Sivakumar, et Sharma 2013a). Nombre de scientifiques ont mis en œuvre et développé plusieurs approches pour combiner les produits d'estimation satellitaires avec les mesures au sol dans le but d'améliorer la disponibilité et la qualité des précipitations.....

Li et Shao (2010) ont développé une méthode de synthèse d'ensemble discret d'observations ponctuelles et de produit pluviométrique dérivé de satellite en Australie basé sur un lissage du noyau non paramétrique mettant l'accent sur la différence entre les données maillées et ponctuelles. Cette méthode leur a permis d'obtenir un produit fusionné avec un RMSE de 3,43 mm, un ME de 0,05 mm et un CE de 0,74 contre une erreur moyenne (ME) de -0,19 mm et un coefficient d'efficacité de 0,29 pour le produit satellite TRMM 3B42v6.

Rozante et al. (2010) ont également fusionné les observations ponctuelles et le produit satellite TRMM 3B42RT sur l'Amérique du sud en se basant sur la méthode d'analyse objective de Barnes. Les résultats ont montré que le RMSE de 5 jours pour TRMM 3B42RT variait de ~4 à ~22 mm, et le POD variait de ~0,63 (pas de pluie) à ~0,2 (fortes pluies) et que le RMSE du produit fusionné variait de ~2 à ~18 mm, tandis que le POD variait de ~0,75 (absence de pluie) à ~0,38 (fortes pluies).

Xie et Xiong (2011) ont utilisé la technique d'interpolation optimale pour combiner le produit satellitaire CMORPH et les observations au sol sur la Chine. Grâce à cette technique, les corrélations de produits dérivés variaient de 0,70 à 0,98 tandis que les corrélations CMORPH corrigées du biais variaient de 0,65 à 0,75.

Woldemeskel, Sivakumar, et Sharma (2013) en utilisant une procédure de pondération linéarisée ont combinée les produits TRMM 3B42v6 et les estimations au sol sur l'Australie. Le RMSE du TRMM 3B42v6 était de 27,8 mm et le ME de -3,42 mm. Les RMSE du produit fusionné étaient de 23,73 mm et 28,24 mm, et les ME étaient de -2,42 mm et -2,65 mm pour 10 % et 20 % des stations, respectivement

Sur le Plateau tibétain, les méthodes de moyenne arithmétique et de pondération du carré d'erreur inverse ont été utilisées pour combiner les estimations des satellites CMORPH, PERSIANN, NRL, TRMM 3B42v7 et 3B42RT et les estimations au sol. Cela leur a permis d'obtenir des produits fusionnés qui présentaient de légères améliorations par rapport aux produits satellitaires pendant la période estivale (Shen et al. 2014).

En Chine, Fu et al. (2016) ont utilisé la méthode de moyenne de modèle bayésien (BMA) pour évaluer les produits satellite MERRA, Princeton, ERA-Interim, CMAP, NCEP, GPCPv2.2, and GPCCv6 sur les principaux bassins versants de la Chine. Les résultats ont montré que les RMSE des produits variaient de ~105 à ~265 mm et le  $R^2$  de ~0,38 à ~0,81, tandis que le produit fusionné présentait un RMSE de ~85 mm et un  $R^2$  de ~0,89.

Manz et al. (2016) en utilisant plusieurs méthodes notamment la modélisation linéaire, IDW résiduel et des méthodes basées sur le krigeage a pu créer une climatologie fusionnée des précipitations par satellite TRMM 2A25 sur les Andes tropicales. Les résultats ont montré que le RMSE du produit variait de ~70 à ~95 mm et le biais relatif (RB) de -37% à -15%. De toutes les méthodes employées, le krigeage ordinaire (OK) a obtenu les meilleurs résultats avec une plage de RMSE de ~45 à ~65 mm et un biais relatif de ~-3% à ~3%.

A l'aide d'une méthode basée sur la fusion des poids en fonction du rayon d'influence effectif des pluviomètres, Shi et al. (2020) ont fusionné des observations satellitaires, des enregistrements pluviométriques et des données du modèle numérique d'élévation du terrain à Pékin en Chine. Les résultats de la simulation de l'écoulement fluvial ont montré que le produit fusionné avait un NSE de 0,66 contre un NSE de 0,38 pour le produit satellite CMORPH.

Avec la pondération de l'erreur quadratique moyenne inverse, Yang et al. (2017) ont fusionné les champs de précipitation satellitaires PERSIANN-CCS et les estimations au sol en Chili. Les résultats ont montré que le RMSE de PERSIANN-CCS variait de 3,08 à 7,35 mm;  $r$  de 0,66 à 0,70; et biais de -3,28 à 1,11 tandis que pour le produit fusionné, le RMSE variait de 0,27 à 2,69 mm;  $r$  de 0,95 à 0,97; et biais de -0,04 à 0,02.

Avec la méthode de la moyenne pondérée avec appariement de la fonction de distribution cumulative (CDF), Beck et al. (2019) ont développé MSWEP V2 qui est le premier ensemble de données de précipitations entièrement mondial avec une résolution de  $0,1^\circ$  obtenue en fusionnant de manière optimale une gamme d'estimation de jauge, de satellite et de

réanalyse. D'après les résultats, l'efficacité Kling-Gupta modifiée (KGE') des produits variait de 0,35 à 0,53 tandis que le KGE' de MSWEPv2.2 était de 0,70

La multitude des méthodes de fusion développées dans le monde entier n'ont eu que pour seul but d'améliorer la caractérisation de la distribution spatio-temporelle des précipitations dans les régions où les données sont rares à n'importe quelle échelle temporelle et ont toujours montré de meilleure performance et moins d'erreur aléatoire que les produits satellitaires utilisés dans ces études.

### **→ Résultats attendus**

Le produit fusionné obtenu présente de meilleures performances et moins d'erreurs aléatoires que le produit satellite TAMSAT et les observations des pluviomètres.

### **→ Structure du mémoire**

En plus, d'une introduction générale et d'une conclusion et des perspectives, ce travail est constitué de deux chapitres. Le chapitre 1 est celui des données, matériel et méthodes. Il est composé de 4 sections principales dont la présentation de la zone d'étude, la description des données utilisées, les logiciels manipulés et surtout de la méthodologie adoptée.

Le chapitre 2 est celui des résultats et discussions. Il est composé de 6 sections où sont détaillés les principaux résultats obtenus.

## **Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes**

### **1.1.Introduction**

Dans ce chapitre est présentée dans une première partie la description du cadre d'étude et sa situation géographique. Dans la seconde partie, est développé l'ensemble des données utilisées, les matériels exploités ainsi que la méthodologie de travail adoptée.

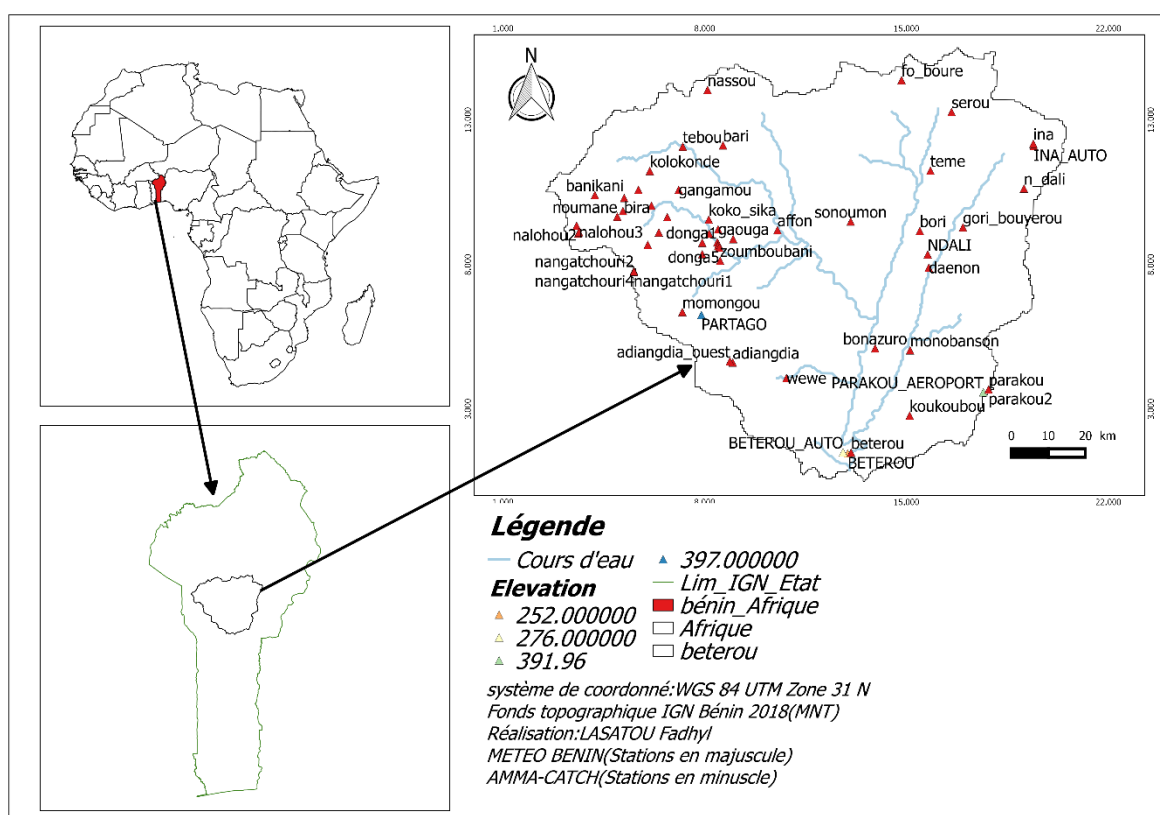
## 1.2 Milieu d'étude

A la dimension de l'Afrique de l'Ouest, l'Ouémé est un petit fleuve côtier qui couvre à Bonou, station la plus avancée avant le delta, une superficie de 46 990 km<sup>2</sup>. Mais au niveau de la République du Bénin, l'Ouémé constitue le plus grand cours d'eau, drainant à lui seul plus du tiers du territoire béninois. Bétérou est l'un de ses sous-bassins. Le bassin versant de Bétérou qui fait objet de ce présent travail est au Nord Bénin situé entre 09° 12'N et 02°16'E. La superficie qu'elle couvre est de 10475 Km<sup>2</sup> (Figure 1). Ce bassin a été très équipé au cours de ces dernières années dense dans le cadre du projet CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du cycle Hydrologique) et du programme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine). C'est ainsi une région de référence connue sur le plan international sous l'appellation « Observatoire Hydrométéorologique de la haute vallée de l'Ouémé » (OHHVO) ou simplement site AMMA-CATCH-Bénin. Sur le plan socio-économique et selon le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH3) de 2002, 45% de la population totale du Bénin vit sur le Bassin de l'Ouémé dont Bétérou est son sous-bassin. Le territoire délimité par le bassin de l'Ouémé abrite huit (08) départements sur les douze (12) et quarante sept (47) communes sur les soixante dix-sept (77) que compte le Bénin. Le climat de la zone d'étude est tropical humide de type soudanien entre le régime humide du Sud et le régime désertique du Nord. La pluviométrie moyenne interannuelle est de 1200 mm en moyenne de 1954 à 2002 (Lawin, 2007). Cette pluviométrie se reparti sur 80 à 110 jours dans l'année. La végétation est principalement composée de savane arborée et de cultures ; le relief est peu marqué avec une altitude comprise entre 200 m et 300 m qui constitue la source du fleuve au pied du mont Tanéka dans la commune de Copargo. Sur cette pénéplaine on rencontre par endroit des collines en forme de dômes et de chaînons. Les études hydrogéologiques indiquent une structure verticale de sol composée de trois zones : une zone de surface (1-3m d'épaisseur), une zone d'altérité formée par les arènes issues de la décomposition des roches (10-20 m d'épaisseur) et une zone de socle fracturée dans sa partie supérieure, puis de moins en moins altérée au fur et à mesure que l'on s'enfonce en profondeur (Bouraima, s.d.). L'Ouémé à Bétérou reçoit des affluents permanents ou temporaires dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau suivant:

Coté	Nom affluent	Longueur du cours	Superficie du bassin
------	--------------	-------------------	----------------------



		(Km)	de l'affluent (Km2 )
Rive gauche	Alpouro	86	2010
	Yérou Maro	120	2590
	Beffa	78	1990
Rive droite	Afon	152	4320
	Donga	74	1285
	Wèwè	49	617



*Figure 1: Carte du bassin versant de Bétérou avec les stations utilisé pour la fusion des données*

### **1.3 Données utilisées**

Les jeux de données utilisés pour atteindre les objectifs de cette étude sont :

- Les données de poste pluviométriques in-situ du réseau AMMA-CATCH (AMMA-CATCH 1990)

AMMA-CATCH est un système d'observation multi-échelle dédié à la surveillance à long terme du cycle de l'eau, la dynamique de la végétation et de leurs interactions avec les ressources en eau en Afrique de l'Ouest.

- Les données d'estimation satellitaires TAMSAT (Maidment et al. 2014; Maidment et al. 2017; Tarnavsky et al. 2012)

La base physique de la méthode TAMSAT est que les précipitations en Afrique proviennent principalement de nuages convectifs profonds qui pénètrent dans les niveaux supérieurs de la troposphère et ont donc des sommets de nuages froids.

### **1.4 Matériel utilisé**

Les outils choisis pour atteindre les objectifs de ce mémoire sont :

- ☐ L'environnement R (R Core Team 2019) version 2022.07.2-576
- ☐ Le logiciel qgis version 2.6.1 pour la réalisation de la carte de la zone d'étude
- ☐ Zotero 6.0.18 pour les références bibliographiques
- ☐ Microsoft Word 2016 pour rédiger le document de mémoire

### **1.5 Méthodologie utilisée**

#### **1.5.1 Contrôle de qualité des données des postes pluviométriques**

Cette étape se résumera à la détermination du pourcentage de données manquantes pour chaque mois sur la période 2001-2010 et à l'identification des valeurs de précipitations aberrantes. Selon (Eischeid, Bruce Baker, et al. 1995) et al (1995), une valeur aberrante est signalée lorsque :

$$X_{ij} - q_{j,50} > f \cdot IR$$

Où  $X_{ij}$  est la hauteur décadaire de l'année  $i$  et de la décade  $j$ ,  $q_{j,50}$  est la médiane (ou le 50e percentile) de la décade  $j$  et  $f$  est le facteur de multiplication. Une valeur typique de  $f$  proposée par Velleman (Velleman et Hoaglin 1981) est 3.

### 1.5.2 Evaluation des erreurs de l'estimation satellitaire de pluie TAMSAT

Cette évaluation s'est résumée à utiliser les métriques de comparaison tels que: le biais, l'erreur quadratique moyenne, l'erreur moyenne absolue et le coefficient de Nash pour comparer les estimations satellitaires TAMSAT aux données de référence AMMA-CATCH.

Ces métriques sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous.

*Tableau 1 : FORMULE DES SCORES DE STATISTIQUES CONTINUES UTILISÉES ET LEURS SCORES PARFAITS.  $X$ =Observation,  $Y$ =satellite,  $\bar{X}$  =moyenne des observations,  $\bar{Y}$  = moyenne des estimations du satellite,  $N$ =nombres de paires de données*

	Nom	Formule	Score parfait
Statistiques continues	CORR	$CC = \text{Des estimations quotidiennes}$	1
	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X - Y)^2}$	0
	Biais en pourcentage	$PBIAS = 100 * (\sum(X - Y) / \sum X)$	0
		$MAE = \frac{\sum  X - Y }{N}$	

	MAE	$NSE = 1 - \frac{\sum (X-Y)^2}{\sum (X-\bar{X})^2}$	0
	Nash		1

### 1.5.3 Combinaison des données in-situ avec les estimations satellitaires TAMSAT

La méthode utilisée pour la fusion est celle décrite par (Dinku et al. 2014). Elle consiste aux étapes suivantes :

- Le calcul de la différence entre l'estimation du satellite et les valeurs du pluviomètre à l'emplacement de chaque station;
- L'interpolation de ces différences à chaque point de grille en utilisant la pondération inverse de la distance;

La pondération inverse de la distance (IDW) est une méthode d'interpolation largement utilisée et facile à mettre en œuvre. Son idée générale repose sur l'hypothèse que la valeur d'attribut d'un point non échantillonné est la moyenne pondérée des valeurs connues dans le voisinage (Shepard 1968). Ainsi, soient  $Z(x_i)$  les valeurs connues de précipitation aux emplacements  $x_i$  et  $Z(x_0)$  la valeur inconnue que l'on désire estimer à l'emplacement  $x_0$ , les formules de l'IDW sont données par les équations ... et ...:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \omega_{i0} Z(x_i) \text{ eq.6}$$

avec,

$$\omega_{oi} = \frac{d_{oi}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_{oi}^{-\alpha}}$$

Dans ces deux équations, N représente, le nombre de poste pluviométrique pris en compte, dans le cadre de cette étude au moins trois postes sont considérés.  $\alpha$  est la puissance considérée et dans cette étude  $\alpha$  est égal à 1.  $d_{oi}$  représente la distance entre chaque poste pluviométrique ( $x_i$ ) et l'emplacement  $x_0$  de la valeur inconnue. Le rayon maximal d'estimation considéré est de 25 km.

- Le rajout des différences interpolées à l'estimation satellitaire.
- La résolution du produit final sera celle de TAMSAT (0,04°)

### 1.5.3 Validation de la méthode de fusion

Le Leave-One-Out-Cross validation (CV) a été utilisé pour valider la méthodologie de fusion. Elle consiste à supprimer une station, puis à appliquer la méthode de fusion pour estimer la valeur à l'emplacement de la station supprimée. Les valeurs estimées sont comparées aux valeurs mesurées en utilisant les métriques suivantes MAE, RMSE et NSE (voir table 1). Par ailleurs, la procédure de validation croisée a été aussi réalisée sur les analyses de précipitation (interpolation simple des données in-situ de précipitation avec la pondération inverse des distances) afin d'évaluer la plus-value de la procédure de fusion comparativement à une analyse simple de précipitation.

## 1.6 Conclusion partielle

Ce chapitre a essentiellement porté sur le cadre de l'étude, les données utilisées et la méthodologie utilisée. L'utilisation en parfaite coordination de ces derniers a abouti aux résultats que nous ferons découvrir le chapitre 2

# Chapitre 2 : Résultats et Discussion

## 2.1. Introduction

Le présent chapitre présente dans un premier volley les résultats issus de la méthode énoncée dans le chapitre précédent puis dans un autre une discussion autour de ces résultats.

## 2.2. Qualité des séries pluviométriques du réseau AMMA-CATCH

La figure 2 présente les pourcentages de données décadaires manquantes pour chaque stations par mois .Les séries pluviométriques AMMA-CATCH de Bétérou présentent des pourcentages très élevés de valeurs manquantes. Parmi les stations équipé sur le bassin versant de Bétérou ,celle à DONGA (DONGA 1,DONGA 2,DONGA 3,DONGA 4,DONGA 5) et à NANGA TCHOURI(NANGA TCHOURI 1,NANGA TCHOURI 2,NANGA TCHOURI 3,NANGA TCHOURI 4) et de PARAKOU 2 présentent des pourcentages de données manquantes allant à plus de 50% pour tous les mois (Fig 2).Les postes situés à ADIANGDIAOUEST ,AFFON ,BETEROU,FOBOURE,KOLOKONDE,MOMONGOU ,TEBOU et WEWE sont celle qui présente le moins de données manquantes ( moins de 25 % du troisième au dixième mois pour les stations de ADIANGDIAOUEST et AFFON,du sixième au douzième mois pour BETEROU,du troisième au onzième mois pour FOBOURE, du cinquième au onzième mois pour MOMONGOU,et du deuxième au onzième mois pour TEBOU et WEWE).Les autres stations AMMA-CATCH employés dans cette étude ont également des pourcentages de données inférieure à 50% pour la plupart des mois. Il n'y a la présence d'aucune valeur aberrante dans les données AMMA-CATCH .En somme,les stations AMMA-CATCH ont des valeurs manquantes de données pluviométriques sur plusieurs décades allant même sur plusieurs années mais nulle doute que les relevées pluviométriques AMMA-CATCH sont de qualité.Les pourcentages élevés de valeur manquantes doivent être dû au faite que bon nombre de ces stations ont arrêtés de fonctionner après plusieurs années.

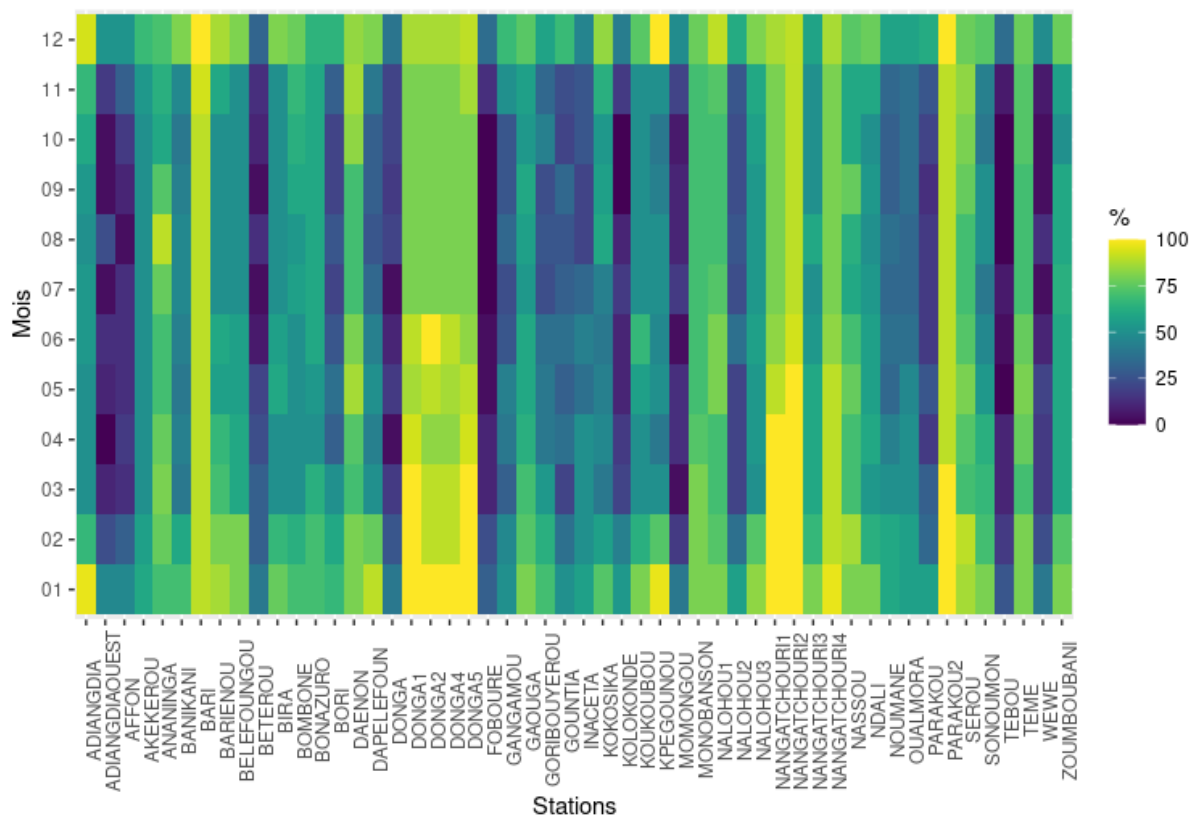
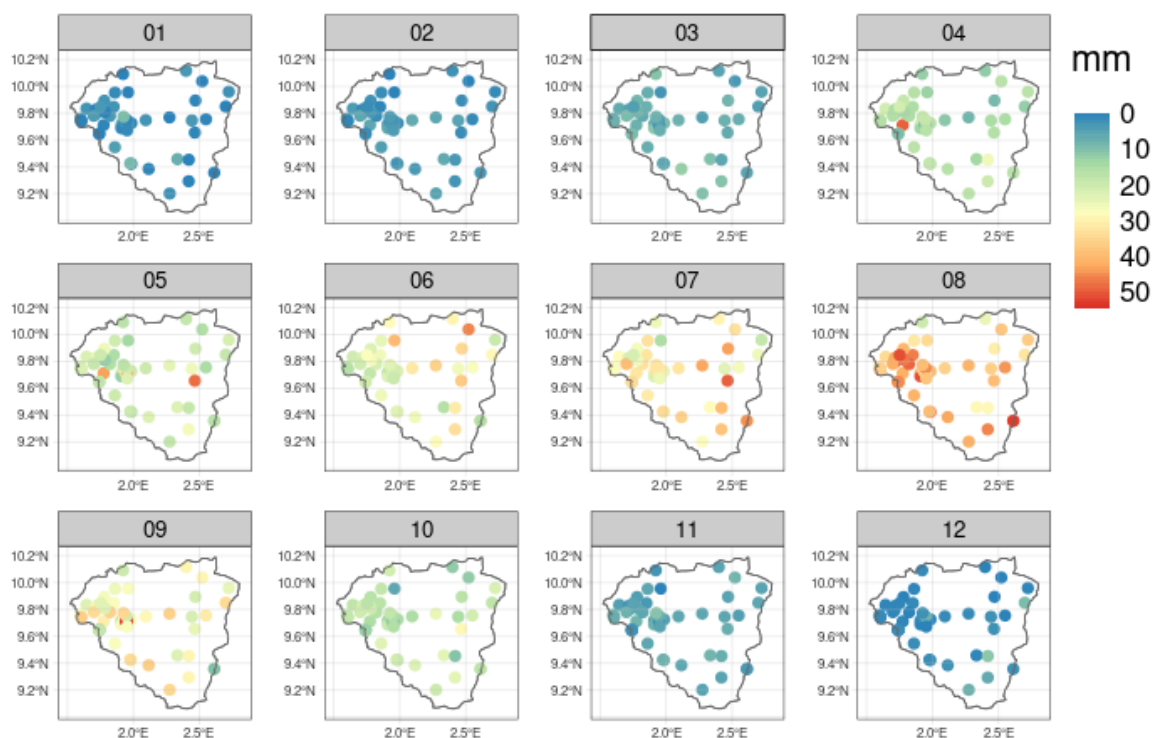


Figure 2 : Pourcentage de données décadaires manquantes par stations et par mois

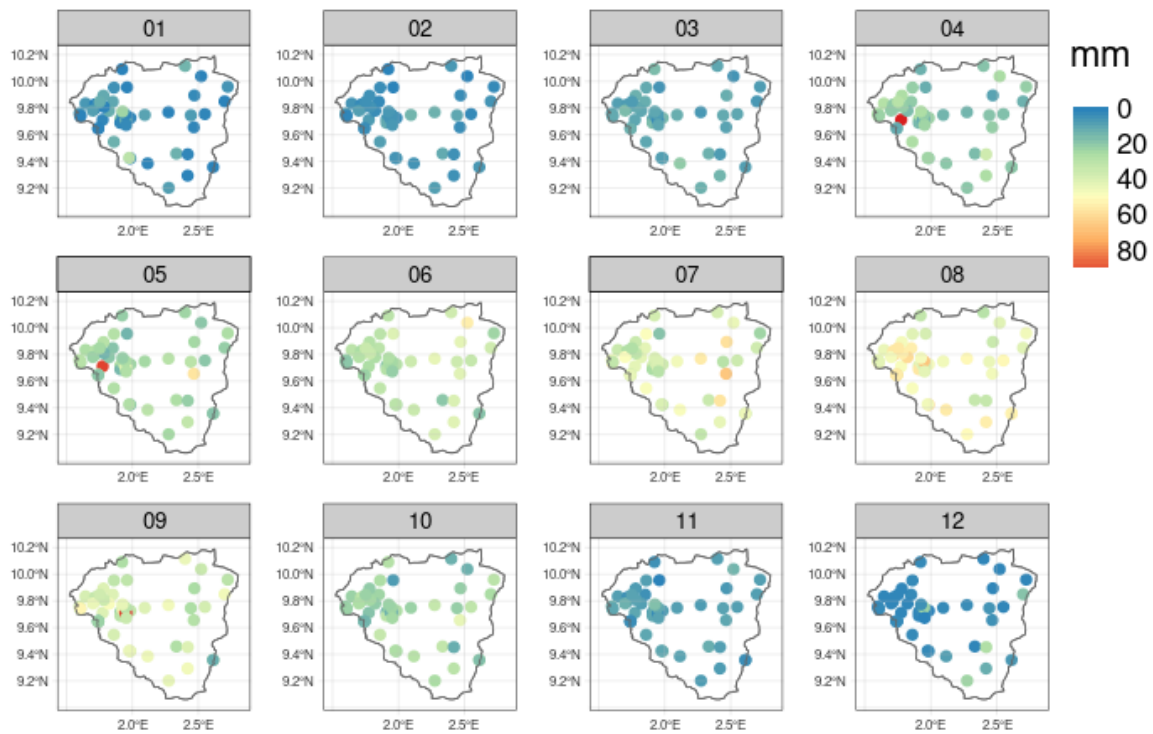
## 2.3 Comparaison des estimations satellitaires TAMSAT aux données de référence AMMA-CATCH



*Figure 3: Erreur absolue moyenne entre les hauteurs décadaires de pluie observées (AMMA-CATCH) et celles estimées par TAMSAT.*

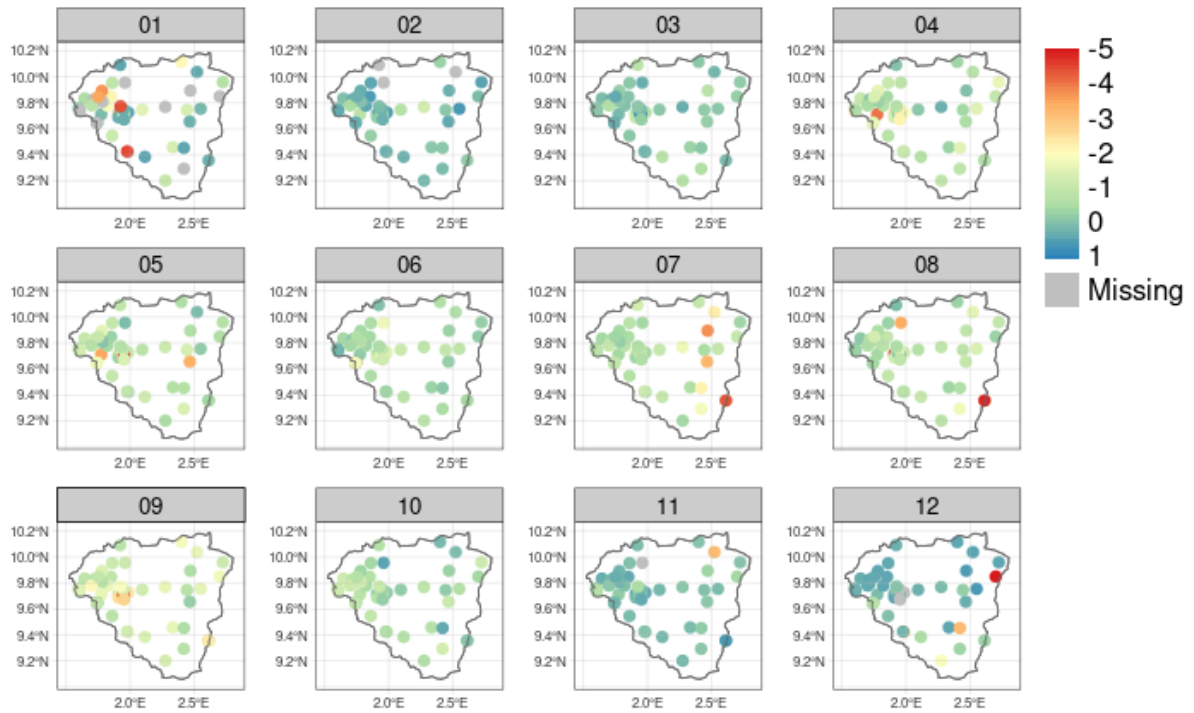
La figure 3 présente l'erreur absolue moyenne (MAE) entre le produit satellite TAMSAT et les observations des pluviomètres. Pour les premiers, deuxième, troisième, onzième et douzième mois, le MAE entre les deux sources de données est inférieure à 10 mm pour presque toutes les stations alors que pour les autres mois le MAE varie entre 20 et 40 mm et pour certaines stations elle va même jusqu'à approcher les 50 mm.





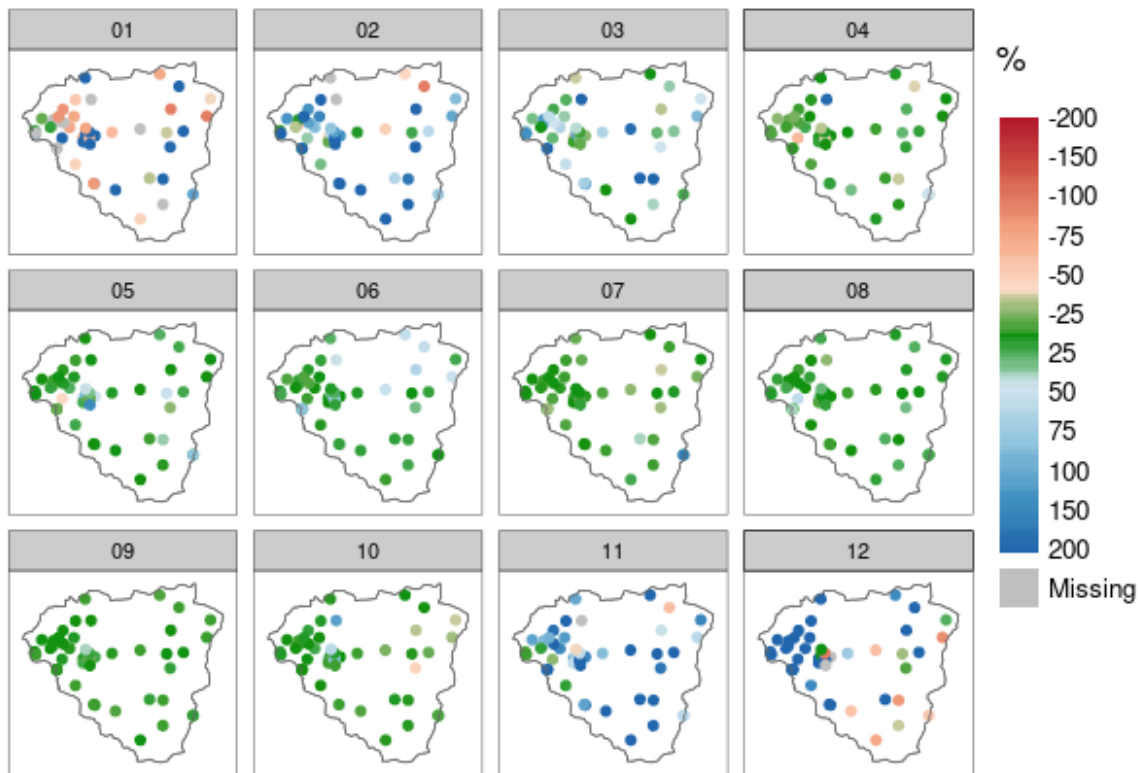
*Figure 4: Erreur quadratique moyenne entre les hauteurs décadaires de pluie observée (AMMA-CATCH) et celles estimées par TAMSAT.*

La figure 4 présente l'erreur quadratique moyenne (RMSE ) entre le produit satellite TAMSAT et les observations des pluviomètres. Le RMSE pour les premiers, deuxième, troisième, onzième et douzième mois entre les deux sources de données est inférieure à 20 mm pour presque toutes les stations alors que pour les autres mois le MAE varie entre 20 et 60 mm et pour certaines stations elle va même jusqu'à approcher les 80 mm.



*Figure 5: NSE entre les hauteurs décadaires de pluie observée (AMMA-CATCH) et celles estimées par TAMSAT.*

La figure 5 présente le coefficient de Nash (NSE) entre le produit satellite TAMSAT et les observations des pluviomètres. Le NSE entre les deux sources de données est proche de -1 dans chaque mois pour presque toutes les stations à l'exception de quelques unes qui ont un NSE allant de -2 à -5.

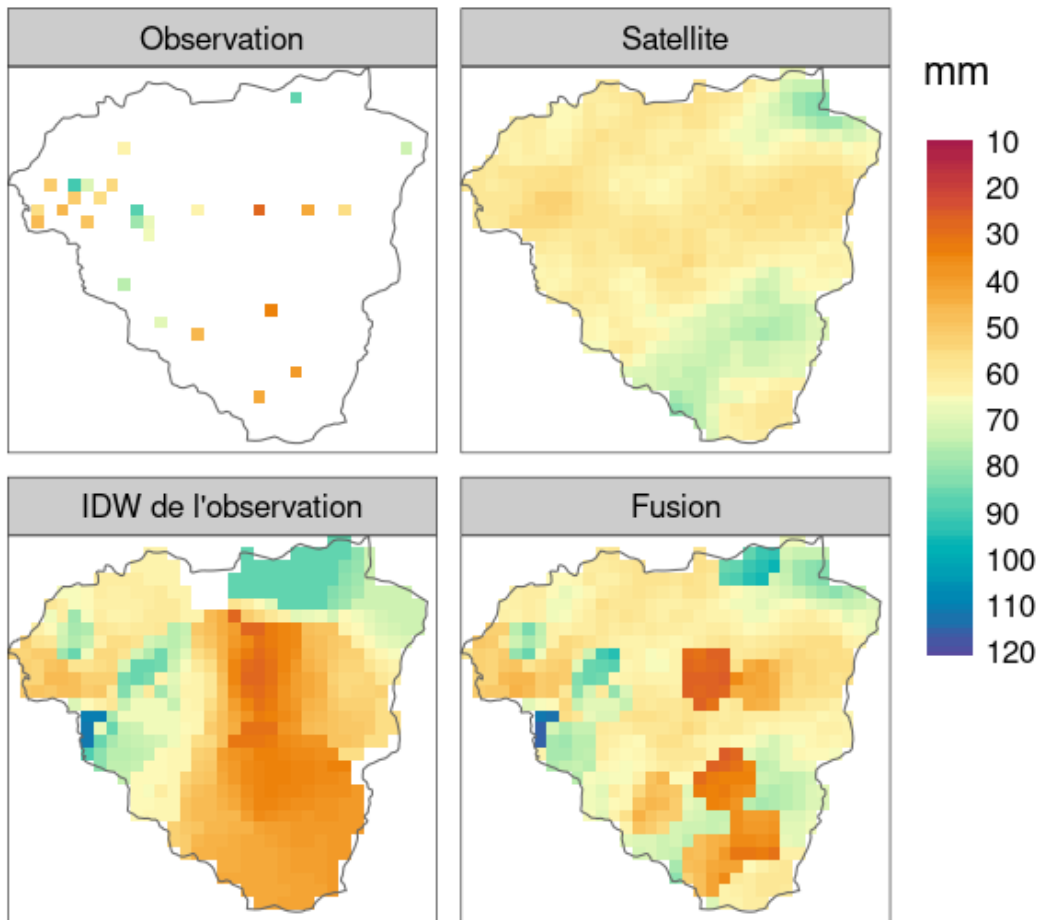


*Figure 6: Biais relatif entre les hauteurs décadaires de pluie observée (AMMA-CATCH) et celles estimées par TAMSAT.*

La figure 6 présente le pourcentage de biais entre le produit satellite TAMSAT et les observations des pluviomètres. Du quatrième jusqu'au dixième mois, le biais relatif entre les hauteurs de pluie décadaire entre les deux sources de données, est proche de 0 % mais pour les autres mois, elles sont variantes entre -200% et 200%. Que ce soit en terme RMSE, de MAE, de Nash ou de biais relatif, le produit satellite TAMSAT présente de grandes inadéquations avec les observations des pluviomètres.

## 2.4 Données fusionnées : une analyse qualitative

Trois produits sont générés : les estimations de précipitations par satellite (TAMSAT), le produit de pluviomètre interpolé par IDW uniquement et le produit combiné satellite/pluviomètre. Les produits satellitaires et combinés sont disponibles de 2001 à 2010. La figure ci-dessous présente un exemple de ces produits pour la deuxième décennie de juillet 2006



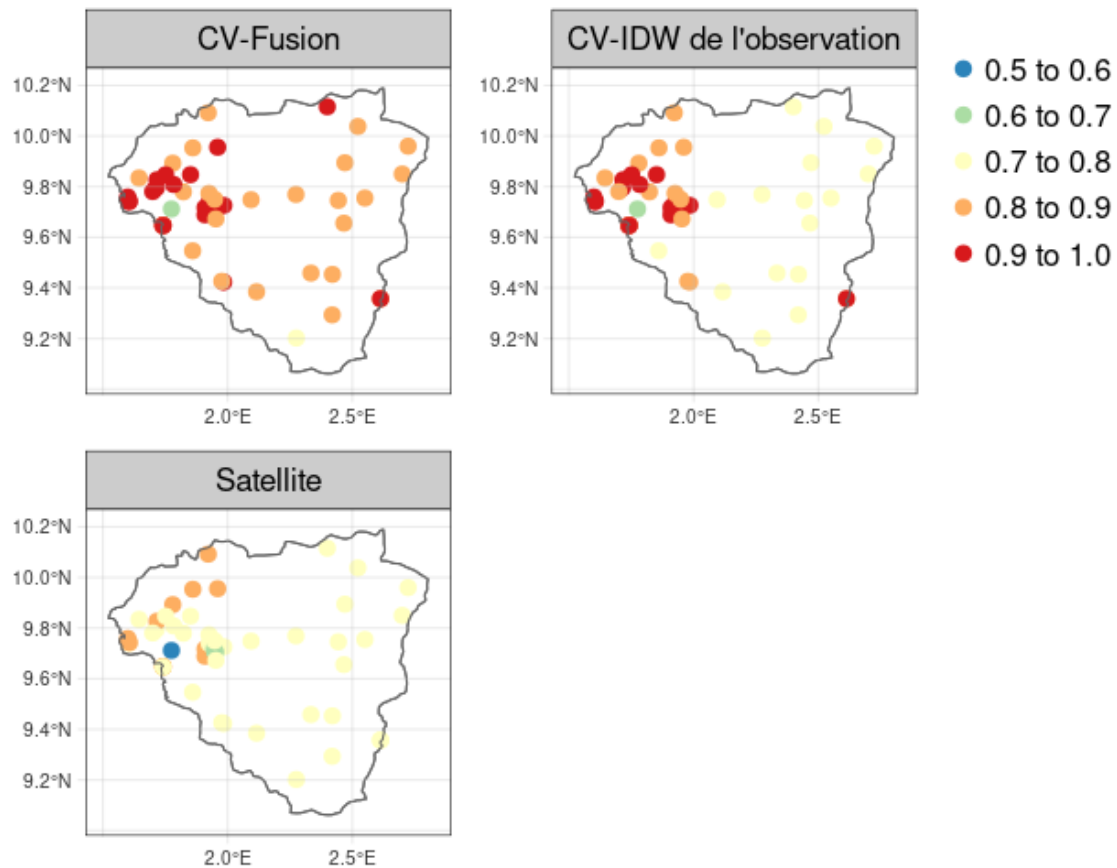
*Figure 7: Données mergées de pluie pour la deuxième décade de juillet 2006. Observation (en haut à gauche), satellitaire brute (en haut à droite), observation interpolée (en bas à gauche), mergée (en bas à droite).*

Le panneau supérieur gauche représente les mesures de la station pour cette décade. Le panneau supérieur droit, inférieur gauche et inférieur droit représentent respectivement l'estimation par satellite, les données de pluviomètres interpolées et la combinaison pluviomètre-satellite. Le produit satellitaire décrit assez bien la structure spatiale globale du champ de précipitation. Cependant, le produit satellitaire sous-estime les quantités de précipitations sur la plupart des régions de Bétérou. La sous-estimation est plus sévère sur la zone nord-est de Bétérou. Cependant une partie de cet écart pourrait également être due à l'inadéquation entre les données ponctuelles des pluviomètres et les estimations satellitaires. Le produit des pluviomètres interpolés du panneau inférieur gauche manque de fortes précipitations sur la partie sud-est de Bétérou qui est visible dans l'estimation du satellite.

Ceci est sûrement dû au manque de station dans ces zones. Le produit combiné permet de surmonter dans une certaine mesure, le manque de station dans ces zones et la sous-estimation du produit satellite. Le produit combiné combine l'information spatiale des estimations satellitaires avec les mesures ponctuelles aux emplacements des pluviomètres. Les produits combinés et maillés sont similaires dans les parties riches en stations. Ainsi, le principal avantage des produits combinés se situe dans les régions de Bétérou où les données sont rares.

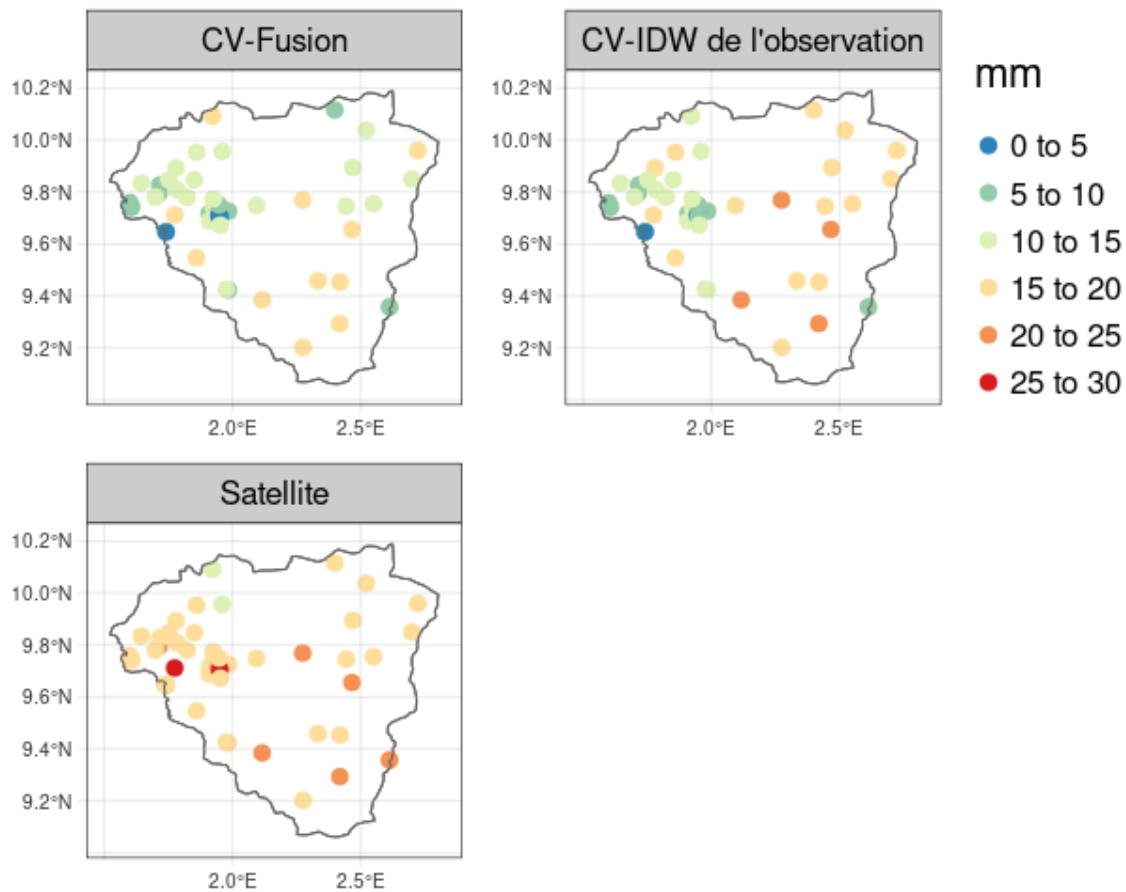
## **2.5 Validation de la méthode de fusion**

Les produits interpolés, satellite et combinés sont évalués à l'aide d'une validation croisée Leave-One-Out (LOOCV) dans laquelle les produits interpolés, satellite et combinés sont comparés aux mesures des jauges correspondantes. LOOCV consiste à exclure une observation successivement et à effectuer la fusion avec les observations restantes pour prédire la valeur à l'emplacement de l'observation exclue, puis l'observation exclue est remplacée dans les données d'observations.



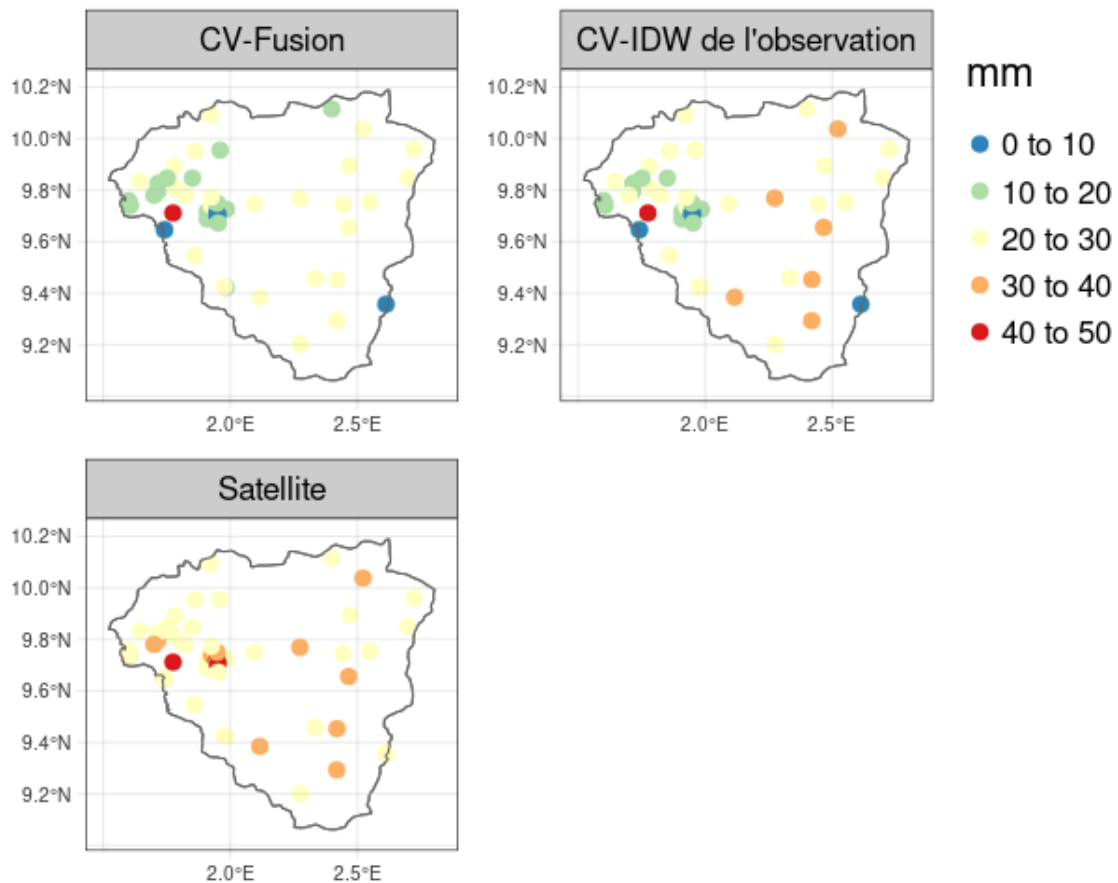
*Figure 8: Distribution spatiale du coefficient de corrélation de Pearson (CORR) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC*

La figure 8 présente les performances en coefficient de corrélation pour le produit satellite TAMSAT, les pluviomètres interpolés et le produit fusionné. Le produit fusionné de meilleure coefficient de corrélation que les pluviomètres interpolés et que le produit TAMSAT. La plupart des stations pour le produit fusionné ont un CORR entre 0,8 et 0,9 tandis que pour les pluviomètres interpolés et le satellite, le CORR est entre 0,7 et 0,8.



*Figure 9: Distribution spatiale de l'erreur absolue moyenne (MAE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC*

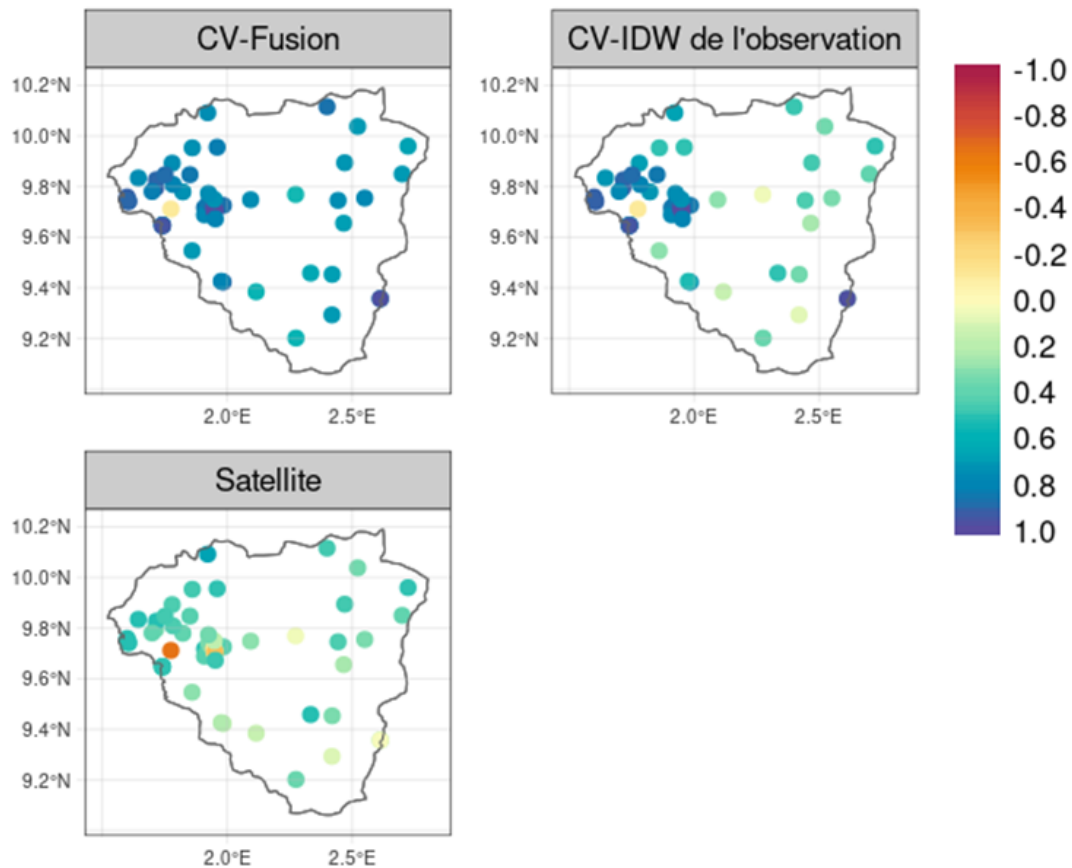
La figure 9 présente les erreurs absolues moyennes (MAE) pour le produit satellite TAMSAT, les pluviomètres interpolés et le produit fusionné. Pour la plupart des stations, le MAE est compris entre 10 et 15 mm pour le produit fusionné, entre 15 et 25 mm pour les pluviomètres interpolés et le produit satellite.



*Figure 10: Distribution spatiale de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC*

La figure 10 présente les erreurs quadratiques moyennes pour le produit satellite TAMSAT, les pluviomètres interpolés et le produit fusionné. Pour la plupart des stations, le RMSE est compris entre 20 et 30 mm pour le produit fusionné, entre 20 et 40 mm pour les pluviomètres interpolés et le produit satellite.





*Figure 11: Distribution spatiale du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) calculée pour chaque emplacement de station par LOOVC*

La figure 11 présente les performances en coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe pour le produit satellite TAMSAT, les pluviomètres interpolés et le produit fusionné. Le produit fusionné a le meilleur coefficient de corrélation que les pluviomètres interpolés et que le produit TAMSAT. La plupart des stations pour le produit fusionné ont un NSE entre 0.6 et 1.0, tandis que pour les pluviomètres interpolés et le satellite, le NSE est entre 0 et 0.4. Le produit fusionné a donné les meilleurs résultats en termes de RMSE, de MAE, de corrélation et de Nash par rapport au produit satellitaire. Le produit fusionné s'est également montré meilleur que les observations interpolées sur les zones avec peu de stations.

## 2.7 Discussion

Le produit fusionné avec les 52 stations sélectionnées à travers la zone de Bétérou donne de meilleurs résultats que les produits satellite et jauge uniquement, notamment en termes de corrélation de Pearson (CORR), d'erreur absolue moyenne (MAE), d'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE). En comparant les produits fusionnés avec toutes les stations à jauge interpolées, les produits fusionnés montrent une meilleure compétence et moins d'erreurs aléatoires. Cela est dû au fait que les résultats sont biaisés en faveur des zones avec une bonne couverture des stations. Ces comparaisons montrent que le produit fusionné est proche de la jauge maillée sur les zones avec une bonne distribution des stations et plus proche de l'estimation satellitaire sur les zones avec un réseau de stations clairsemé. Cependant, le produit fusionné élimine efficacement la sous-estimation par le produit satellite dans tous les cas. C'est le but principal de la méthode d'ajustement du biais employée ici.

## 2.8 Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, nous avons constaté que la méthode d'ajustement du biais simple employée pour la fusion des données nous a permis d'obtenir un produit pluviométrique avec de meilleure performance et moins d'erreurs aléatoires.

## Conclusion et perspectives

Dans le cadre de produire des données pluviométriques de bonne qualité et de résolution spatiale assez fine pour la production de connaissances scientifiques et pour le suivi pluviométrique à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou ,nous avons combiner le relevés pluviométriques du projet AMMA-CATCH et les estimations du satellite TAMSAT.Les pourcentages élevés de données manquantes des stations AMMA-CATCH et les inadéquations entre les estimations pluviométriques TAMSAT et les celle des relevés pluviométriques AMMA-CATCH évaluer dans cette étude ont été des sources d'incertitude dans la réalisation d'un produit fusionné de meilleure qualité.Néanmoins,la méthode d'ajustement du biais simple employé pour la fusion des données ,nous a fournir un produit pluviométrique avec un coefficient de corrélation de Pearson entre 0.8 et 0.9,une erreur moyenne entre 10 et 15 mm,une erreur quadratique moyenne entre 20 et 30 mm,un coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe entre 0.6 et 1.Ce qui est une amélioration par rapport au produit pluviométrique interpolé et au produit satellitaire avec des coefficients de corrélation de Pearson entre 0.7 et 0.8 ,des erreurs moyennes entre 15 et 25 mm,des erreurs quadratiques moyennes entre 20 et 40 mm,des coefficients d'efficacité de Nash-Sutcliffe entre 0 et 0,4.La méthode d'ajustement du biais simple a donc bel et bien permis d'obtenir un produit fusionné de meilleure qualité.La méthode d'ajustement de biais simple nous a permis d'obtenir un produit fusionné présentant de légère amélioration par rapport au produit satellite TAMSAT néanmoins il nous revient de trouver une méthode plus sophistiqué qui nous permettra d'obtenir un produit fusionné avec des résolutions temporelles et spatiales plus fines mais également de trouver une méthode pour combler les données manquantes dans les relevés pluviométriques AMMA-CATCH afin d'éviter d'introduire de nouvelle source d'erreur dans les résultats de la procédure de fusion des données.

## Références bibliographiques

- AMMA-CATCH. 1990. « AMMA-CATCH: A Hydrological, Meteorological and Ecological Observatory on West Africa: AMMA-CATCH Is Labeled by the French Institutes IRD and CNRS as “National Observation Service”. It Is Part of the French Research Infrastructure OZCAR. » CSV,NETCDF,O&M 1.0. IRD, CNRS-INSU, OSUG, OMP, OREME.  
<https://doi.org/10.17178/AMMA-CATCH.ALL>.
- Beck, Hylke E., Eric F. Wood, Ming Pan, Colby K. Fisher, Diego G. Miralles, Albert I. J. M. van Dijk, Tim R. McVicar, et Robert F. Adler. 2019. « MSWEP V2 Global 3-Hourly 0.1° Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 100 (3): 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>.
- Bouraima, Adamou WOROU WARA. s. d. « MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : EAU », 53.
- Dinku, Tufa, Kinfe Hailemariam, Ross Maidment, Elena Tarnavsky, et Stephen Connor. 2014. « Combined Use of Satellite Estimates and Rain Gauge Observations to Generate High-Quality Historical Rainfall Time Series over Ethiopia: COMBINING SATELLITE AND GROUND OBSERVATIONS ». *International Journal of Climatology* 34 (7): 2489-2504.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3855>.
- Eischeid, Jon K, C Bruce Baker, Thomas R Karl, et Henry F Diaz. 1995. « The quality control of long-term climatological data using objective data analysis ». *Journal of Applied Meteorology* (1988-2005), 2787-95.
- Eischeid, Jon K., C. Bruce Baker, Thomas R. Karl, et Henry F. Diaz. 1995. « The Quality Control of Long-Term Climatological Data Using Objective Data Analysis ». *Journal of Applied Meteorology* 34 (12): 2787-95.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2787:TQCOLT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2787:TQCOLT>2.0.CO;2).
- Fu, Yang, Jiangzhou Xia, Wenping Yuan, Bing Xu, Xiaoxu Wu, Yang Chen, et Haicheng Zhang. 2016. « Assessment of Multiple Precipitation Products over Major River Basins of China ». *Theoretical and Applied Climatology* 123 (1-2): 11-22.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-014-1339-0>.
- Kidd, C., et V. Levizzani. 2010. « Status of satellite precipitation retrievals ». Preprint. Hydrometeorology/Instruments and observation techniques.  
<https://doi.org/10.5194/hessd-7-8157-2010>.
- Kidd, Chris, et George Huffman. 2011. « Global Precipitation Measurement: Global Precipitation Measurement ». *Meteorological Applications* 18 (3): 334-53.  
<https://doi.org/10.1002/met.284>.
- Li, Ming, et Quanxi Shao. 2010. « An Improved Statistical Approach to Merge Satellite Rainfall Estimates and Raingauge Data ». *Journal of Hydrology* 385 (1-4): 51-64.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.023>.
- Maidment, Ross, D. I. F. Grimes, Richard P. Allan, Elena Tarnavsky, Marc Stringer, Tim J. Hewison, Rob Roebeling, et Emily Black. 2014. « The 30 year TAMSAT African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) data set ». *Journal of Geophysical Research* 119 (18).  
<https://doi.org/10.1002/2014jd021927>.
- Maidment, Ross I, David Grimes, Emily Black, Elena Tarnavsky, Matthew Young, Helen Greatrex, Richard P Allan, et al. 2017. « A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa ». *Scientific Data* 4 (1).  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>.
- Manz, Bastian, Wouter Buytaert, Zed Zulkafli, Waldo Lavado, Bram Willems, Luis Alberto Robles, et Juan-Pablo Rodríguez-Sánchez. 2016. « High-resolution Satellite-gauge Merged Precipitation Climatologies of the Tropical Andes ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121 (3): 1190-1207. <https://doi.org/10.1002/2015JD023788>.
- R Core Team. 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R

- Foundation for Statistical Computing. {<https://www.R-project.org/>}.
- Rozante, José Roberto, Demerval Soares Moreira, Luis Gustavo G. de Goncalves, et Daniel A. Vila. 2010. « Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America ». *Weather and Forecasting* 25 (3): 885-94. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>.
- Shen, Yan, Anyuan Xiong, Yang Hong, Jingjing Yu, Yang Pan, Zhuoqi Chen, et Manabendra Saharia. 2014. « Uncertainty Analysis of Five Satellite-Based Precipitation Products and Evaluation of Three Optimally Merged Multi-Algorithm Products over the Tibetan Plateau ». *International Journal of Remote Sensing* 35 (19): 6843-58. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.960612>.
- Shepard, Donald. 1968. « A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data ». In *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference On* -, 517-24. Not Known: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>.
- Shi, Haiyun, Ji Chen, Tiejian Li, et Guangqian Wang. 2020. « A New Method for Estimation of Spatially Distributed Rainfall through Merging Satellite Observations, Raingauge Records, and Terrain Digital Elevation Model Data ». *Journal of Hydro-Environment Research* 28 (janvier): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2017.10.006>.
- Tarnavsky, Elena, Mark Mulligan, Gregory Husak, Gregory J. Husak, et Greg Husak. 2012. « Spatial disaggregation and intensity correction of TRMM-based rainfall time series for hydrological applications in dryland catchments ». *Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques* 57 (2): 248-64. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.637498>.
- Velleman, Paul F, et David C Hoaglin. 1981. *Applications, basics, and computing of exploratory data analysis*. Duxbury Press.
- Woldemeskel, Fitsum M., Bellie Sivakumar, et Ashish Sharma. 2013a. « Merging Gauge and Satellite Rainfall with Specification of Associated Uncertainty across Australia ». *Journal of Hydrology* 499 (août): 167-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.039>.
- . 2013b. « Merging Gauge and Satellite Rainfall with Specification of Associated Uncertainty across Australia ». *Journal of Hydrology* 499 (août): 167-76. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.039>.
- Xie, Pingping, et An-Yuan Xiong. 2011. « A Conceptual Model for Constructing High-Resolution Gauge-Satellite Merged Precipitation Analyses: GAUGE-SATELLITE MERGED PRECIP ANALYSIS ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 (D21). <https://doi.org/10.1029/2011JD016118>.
- Yang, Zhongwen, Kuolin Hsu, Soroosh Sorooshian, Xinyi Xu, Dan Braithwaite, Yuan Zhang, et Koen M. J. Verbist. 2017. « Merging High-Resolution Satellite-Based Precipitation Fields and Point-Scale Rain Gauge Measurements-A Case Study in Chile: Satellite-Gauge Data Merging Framework ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122 (10): 5267-84. <https://doi.org/10.1002/2016JD026177>.